第41卷 第2期
2024年2月

干 旱 区 研 究
ARID ZONE RESEARCH

Vol. 41 No. 2
Feb. 2024

东昆仑木孜塔格峰地区水汽来源分析

吴佳康[1,2]， 陈丽花[1,2]， 车彦军[1,2,3,4]， 张明军[3,4]， 曹 昀[1]， 谷来磊[3,4]

（1. 江西师范大学地理与环境学院，江西 南昌 330022；2. 宜春学院地理科学系，江西 宜春 336000；
3. 西北师范大学地理与环境科学学院，甘肃 兰州 730070；4. 甘肃省绿洲资源环境与可持续发展重点实验室，
甘肃 兰州 730070）

摘 要：降水是山地冰川重要的补给，水汽来源与降水的多少密切相关。本文选取昆仑山东部木孜塔格峰现代冰川分布区，基于混合单粒子拉格朗日综合轨迹（HYSPLIT）模型和全球数据同化系统（GDAS）对木孜塔格峰地区2005—2022年水汽来源进行后向轨迹分析，并探讨其季节变化，揭示木孜塔格峰地区水汽来源及其规律。结果表明：木孜塔格峰地区的水汽源主要随着中纬度西风带向欧亚内陆延伸，在青藏高原西部分为三路，分别从天山山脉、帕米尔高原以及从高空平流层进入我国青藏高原，印度洋水汽向北翻越喜马拉雅山或者西北转向东与西风环流混合进入高原腹地。木孜塔格峰地区主要由陆源水汽控制，分别是从帕米尔高原和天山山脉进入，其水汽占总量的62.52%；海源水汽则为西风带的高空水汽（大西洋水汽）以及印度洋水汽，占总量的37.48%；且海源水汽的占比逐年上升。从多年季节平均角度分析，除了以上的水汽源以外，夏季的局地再循环水汽比重较高，占总量的22.64%。本文研究结果将为理解东昆仑木孜塔格峰地区水循环提供重要参考。

关键词：木孜塔格峰；HYSPLIT模型；水汽来源；东昆仑

以青藏高原为核心的第三极地区是众多大江大河的发源地[1]，降水是青藏高原地区水资源的重要补给来源，局部地区的降水与水汽来源密切相关。青藏高原水汽来源的众多研究表明，青藏高原降水的水汽来源主要有西风带水汽输送、季风环流和局地环流，不同季节、不同区域水汽来源差异较大[2-3]。例如，受西风环流控制的西北水汽源区和高原局地环流是青藏高原北部降水的主要水汽来源，其贡献率分别可达39%~43%和26%~30%；受季风环流影响的东南地区，季风环流水汽贡献比占51%~54%，而源自青藏高原的局地水汽贡献为14%~16%[2,4]。然而，青藏高原中部和北部区域，局地水汽再循环对降水贡献率的研究表明，局地环流对降水贡献率依然很显著。如基于青藏高原西北部两个冰芯的氘含量记录估算了过去几十年当地的水分循环，指出青藏高原西北部平均近一半的降水是由局地水汽再循环提供[5]。因此，西风输送和季风环流及青藏高原局地水汽循环的研究均量化和证明了外来水汽和局地水汽对藏北地区降水至关重要[6]。为了便于讨论，水汽来源不妨划分为陆源水汽、海源水汽和局地再循环水汽[5,7]。对于青藏高原中部而言，陆地的水汽来源起了主导作用[7-8]。1998年6—9月青藏高原安多及其北部地区，海源水汽带来降水量占到总降水量的32.06%，局地水循环形成的降水量占总降水量的46.86%[8]。水汽运移过程为海洋性气团携带的水汽经过若干次“凝结-降水-蒸发-再凝结”等过程，不断循环形成降水，并伴随季风环流作用向高原中西部输送而至。因此，分析水汽来源对于理解木孜塔格峰地区水循环过程具有显著的科学意义。

水汽来源示踪方法已相对成熟，如利用氢氧稳定同位素示踪气候特征和水汽来源，获取不同水汽来源对局地降水的贡献率[8-11]。如基于降水中海洋水汽氧同位素($\delta^{18}O$)较低、局地水汽氧同位素($\delta^{18}O$)

收稿日期：2023-07-31； **修订日期：**2023-10-18
基金项目：第三次新疆综合科学考察项目(2021xjkk0101)；国家自然科学基金项目(42101135)；江西省自然科学基金项目(20232BAB203060)；甘肃省绿洲资源环境与可持续发展重点实验室基金项目(GORS202103)；江西师范大学研究生国内外访学研究项目共同资助
作者简介：吴佳康（1999-），硕士研究生，主要从事冰川区水文过程研究. E-mail: wjiakang@126.com
通讯作者：车彦军. E-mail: che_yanjun@126.com

较高这一认识，定量分析海洋水汽和局地水汽等对当地降水的贡献率[8]。同时，利用不同算法和模型追踪、定量水汽来源的方法也得到广泛应用。如利用Water Accounting Model模型追踪和定量分析青藏高原水汽的结果表明，形成高原降水的90%水汽中来自陆源水汽约占69%，海源蒸散发水汽约占21%[12]；WRF模拟发现，印度平原水汽通过"抬升-翻越"机制，使得印度洋水汽能够深入高原腹地[13]。此外，拉格朗日方法和欧拉方法在水汽来源追踪模式均得到广泛应用[14]。拉格朗日方法可以提供更多有关水汽输送过程中湿度变化的信息，其模型的不断完善极大地推进水汽源研究工作的展开。如利用拉格朗日方法分析比较1980—2016年湿季（5—8月）青藏高原水汽来源时，发现邻近地区水汽贡献和印度夏季风各自对青藏高原北部和南部降水具有显著贡献，并且认为到达青藏高原北部的远距离水汽源地主要集中在以西风带为主区域[15]。也有研究表明，青藏高原西北部慕士塔格地区水汽主要来源于由西风传输的西伯利亚（陆源）、北大西洋及其周边地区（海源），沿途有局地水汽的补充[16]。昆仑山北坡格尔木河流域水汽来源研究也发现，水汽来源主要为西风环流携带的海源水汽为主，陆源水汽也有一定贡献[9]。昆仑山位于青藏高原北缘，水汽来源受西风环流、季风环流和局地水循环综合影响，较为复杂。尤其是东昆仑木孜塔格峰地区，位于阿尔金山自然保护区无人区，交通不便，地面观测资料短缺，对其水文过程的认识有限，尤其是水汽来源，极为复杂。因此，开展该地区水汽来源研究，将有助于理解该地区水循环过程。

木孜塔格峰位于青藏高原北部，是昆仑山东部最高峰，也是东昆仑冰川最为发育的地区。该区分布有大规模的冰帽，冰川融水也是当地重要的水源之一，降水是地表水资源重要的补给方式。然而，对木孜塔格峰地区水汽来源的研究，除了水汽主要来自西风气流这一共识之外，对于局地水汽和其他水汽来源的研究相对较少，需借助模型计算深入分析[17]。鉴于此，本文以木孜塔格峰地区为研究范围，考虑到该地区地面观测资料和降水样品较少，选用混合单粒子拉格朗日综合轨迹（HYSPLIT）模型，对木孜塔格峰地区2005—2022年水汽来源进行后向轨迹追踪计算，并对其轨迹进行聚类分析，结合阿雅克气象站降水资料，探讨木孜塔格峰地区的水汽来源及其贡献，揭示东昆仑木孜塔格峰地区水循环过程。

1 研究区概况

木孜塔格峰（36°16′~36°42′N，87°5′~87°39′E）是青藏高原北缘，昆仑山东部发育最大的现代冰川作用区（图1）。木孜塔格峰常年受到大陆气团的影响，温度年际变化和日变化较大[18]。3月西风开始向北移动，标志着木孜塔格峰地区雨季的到来[19]。

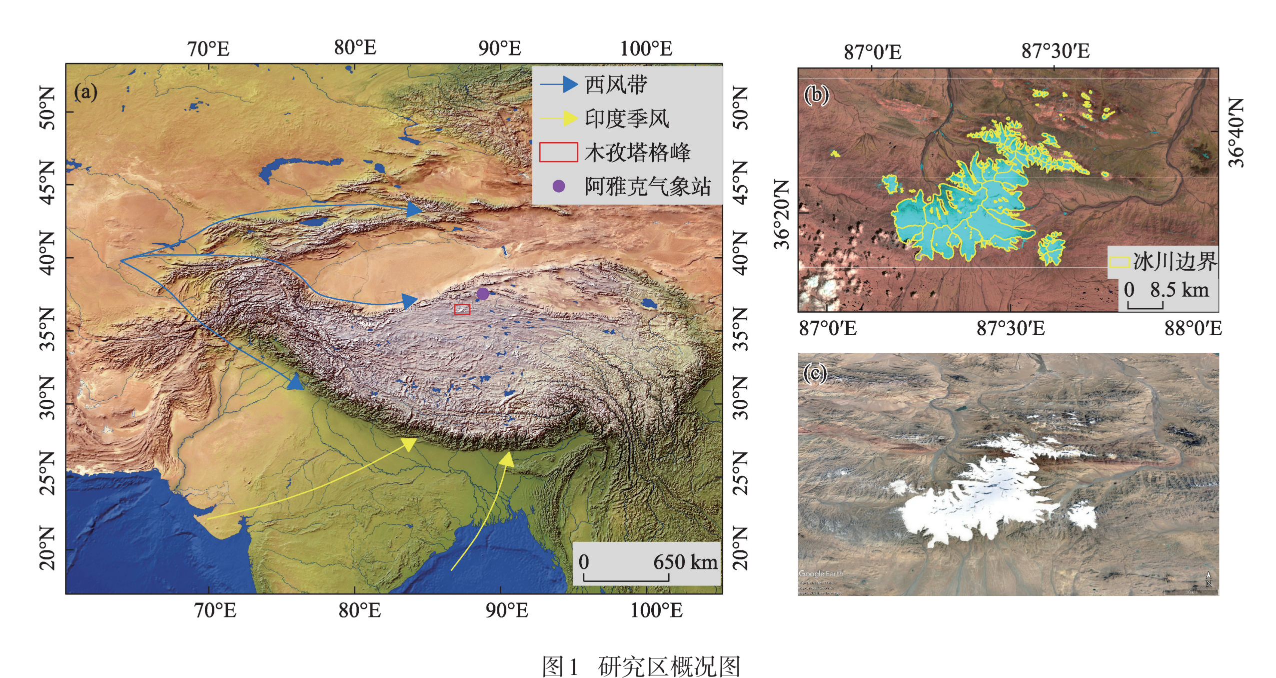


图1 研究区概况图

Fig. 1 Overview map of the study area

有研究表明，雪线附近的年降水量约为300 mm，冰川主要为夏季补给型[20]。根据中国第二次冰川编目结果显示，木孜塔格峰冰川由214条冰川组成，木孜塔格峰冰川面积超过660 km^2，冰川从峰顶向四周呈放射状分流[19-20]。木孜塔格峰最高海拔约6973 m，山脉呈东北-西南走向，雪线海拔约5500~5750 m[21]。

2 数据与方法

2.1 观测资料

阿雅克自动气象站(37.54°N，88.80°E)位于木孜塔格峰地区东北部，海拔4300 m。对木孜塔格峰地区周边阿雅克气象站2013年5月至2018年8月15日降水数据进行分析，由于环境恶劣，监测的气象数据时间尺度短且部分数据缺失，其中，2014年5月缺4 d，缺失数据天数占1.1%；2015年7月28日至9月22日数据缺失，占15.1%；2017年7月、8月、9月数据都有缺失，占15.6%；2018年1月和8月部分数据缺失，占6.6%。因此，利用剩余降水数据进行月降水变化的分析，且2014年、2016年、2017年降水数据比较完整，用此时段的年降水量进行分析。

2.2 GDAS数据

全球数据同化系统(Global Data Assimilation System，GDAS)是美国国家海洋和大气管理局(NOAA)国家环境预测中心(NCEP)开发的一个大气模型，使用的数值天气预报模式是全球天气预报系统(GFS)[22]，描述了在给定时间和位置的大气的状况。GADS数据提供了23个压力等级，从1000 hPa到20 hPa(约26 km高度)，这些数据分布在全球经纬网格上，空间分辨率为1°×1°，时间分辨率为6 h，时间尺度为2005年1月至2022年11月14日[23]。这些数据可以很好的分析全球不同地区水汽的来源和轨迹。因此，本文选择GDAS数据来分析木孜塔格峰地区的水汽来源，数据是由NOAA的空气资源实验室(ARL)作为免费共享数据提供，下载地址ftp://arlftp.arlhq.noaa.gov/pub/archives/gdas1。

2.3 HYSPLIT

混合单粒子拉格朗日综合轨迹(the HYbrid Single-Particle Lagrangian Integrated Trajectory，HYSPLIT)模型，是由美国国家海洋和大气管理局(NOAA)的空气资源实验室(ARL)和澳大利亚墨尔本气象局(ABM)共同开发一种用来计算粒子的分散和沉积模拟以及向前或向后的空气块轨迹的模型[24-25]。HYSPLIT模型有两种模式，分别是前向轨迹模式和后向轨迹模式。后向轨迹是指气团在到达目的地之前的运行轨迹，可以判断该地区水汽的来源。气团轨迹计算公式[26]如下：

$$P'(t+\Delta t)=P(t)+V(P,t)\Delta t \quad (1)$$

$$P(t+\Delta t)=P(t)+0.5[V(P,t)+V(P',t+\Delta t)]\Delta t \quad (2)$$

式中：$P'(t+\Delta t)$为经过Δt时间后的第1推算位置；$P(t)$为初始时刻的位置；$V(P,t)$为经过时空差值的t时刻P位置处的速度向量；Δt为时间步长；$P(t+\Delta t)$为$t+\Delta t$时刻气团中心的最终位置；$V(P',t+\Delta t)$为经过时空差值的$t+\Delta t$时刻P'位置处的速度向量。

为了解木孜塔格峰地区水汽来源，通过确定降水的起源来建立降水和气团的初步关系。使用TrajStat软件，根据后向轨迹模型，以木孜塔格峰(36.40°N，87.34°E)为起点，选取起始高度时考虑到木孜塔格峰的最高海拔，同时结合前人研究[27]和反复试验，最终将起始高度设置为距地面500 m处，把追踪时长设定为144 h(6 d)[26]并且以每天4条轨迹(UTC 0:00、6:00、12:00、18:00)的尺度对2005年、2010年、2015年、2020年和4个季节(用1个季节的中间月份代表，分别是1月、4月、7月和10月)的后向轨迹进行计算和聚类。

聚类是指按照相似的原则对目标轨迹进行聚类的现象[28-29]。在TrajStat软件中，本文根据点距离原则及总空间方差(TSV)[30]变化曲线，将模拟的水汽轨迹进行聚类分组，得出研究区的水汽来源及各水汽来源的贡献，分析木孜塔格峰地区的水汽来源的空间分布特征。

3 结果与讨论

3.1 木孜塔格峰地区年降水及月降水变化

对阿雅克气象站年降水及季节降水进行分析(图2)，结果显示，该地区2014年、2016年、2017年降水量分别为116.80 mm、195 mm和201.2 mm，年平均降水为171 mm，年变化率为29.7 mm·a^{-1}(P=0.17)，该地区降水在较短时间内大幅增加，但是由于数据缺失较多，趋势变化没有通过显著性检验。该地区降水主要集中在夏季，春秋季降水量次之，冬季降水量最少。2014年夏季降水量达78.5 mm，占全年降水量的67.2%，2016年夏季降水量达

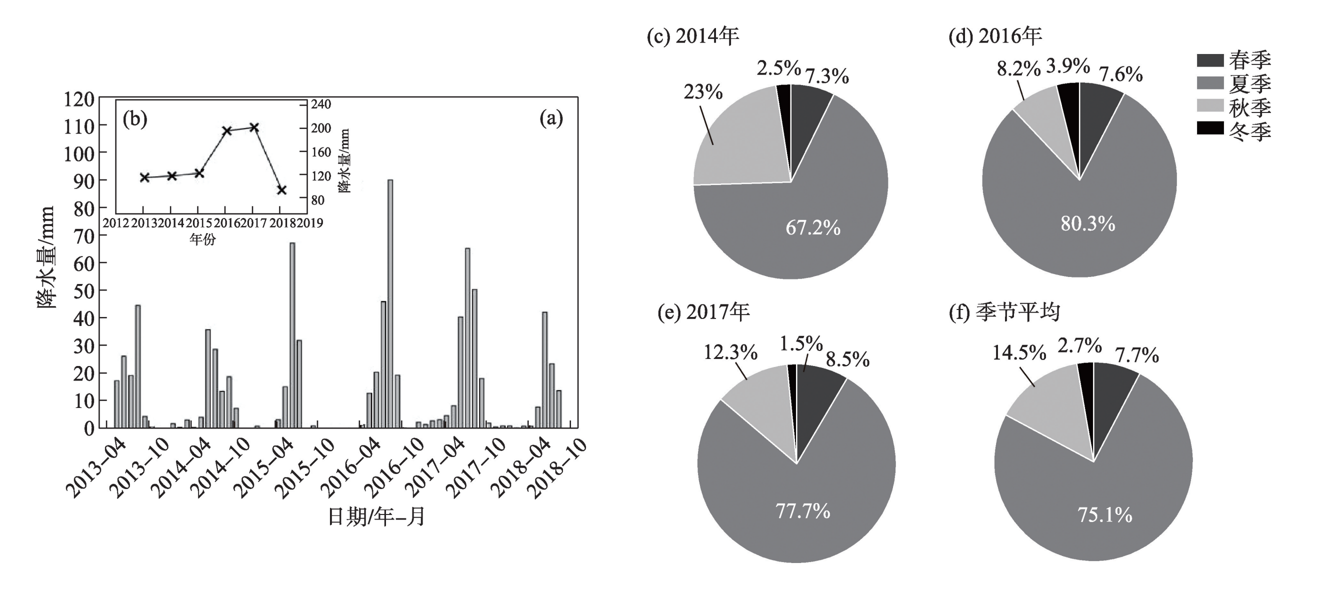


图2　阿雅克气象站2013—2018年月降水和年降水变化

Fig. 2　Monthly and annual precipitation changes at the Ayak Meteorological Station from 2013 to 2018

156.6 mm，占全年降水量的80.3%，2017年夏季降水量达156.3 mm，占全年降水量的77.7%，夏季降水呈波动增加趋势，年变化率为27.8 mm·a^{-1}（P=0.21），趋势变化未通过显著性检验。

3.2　木孜塔格峰地区水汽来源分析

为了更好的理解该地区的水汽来源，将水汽源主要分为陆源和海源两种，区分陆源和海源水汽的依据为[5,7]：(1) 水汽来源方向；(2) 水汽在相同时间移动的距离。本文对该地区的水汽轨迹进行了后向追踪计算，同时根据欧里几得距离聚类原则和TSV变化曲线，在年尺度上对木孜塔格峰地区的水汽轨迹多年平均(2005—2022年)聚为4类来展示木孜塔格峰地区水汽来源的空间分布，探索木孜塔格峰地区水汽冰来源，了解主要控制该地区降水的水汽。

如图3a所示，该地区的水汽主要是4个路径，分别是西南、西北偏北、西北偏西和正西方向，各方向水汽的占比分别为21.72%、36.26%、26.26%和15.76%。其中，西北偏北方向的水汽占比最大。此外，根据水汽来源综合考虑，正西方向和西南方向

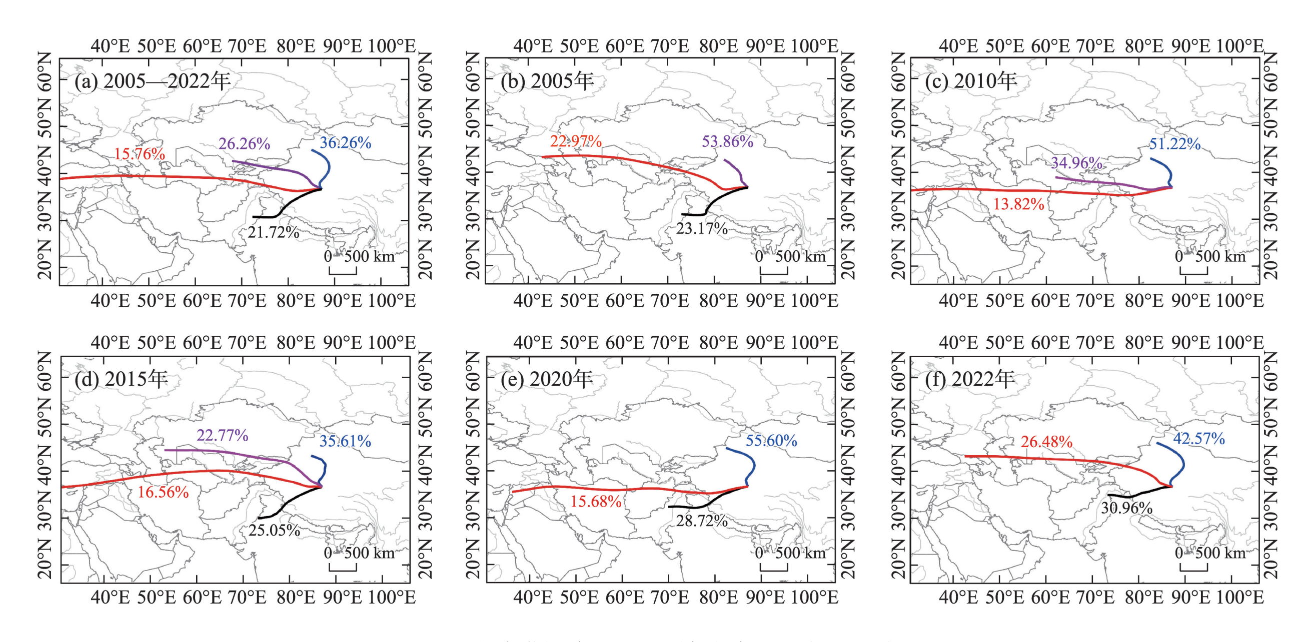


图3　木孜塔格峰地区不同年份年平均轨迹聚类

Fig. 3　Trajectory clustering diagrams in different years in Ulugh Muztagh area

的水汽归类为海源,分别来自大西洋和印度洋,对应全球环流系统的西风带和印度季风。由于印度洋水汽进入青藏高原需越过平均海拔4000 m的高原,相同时间来自印度洋水汽的轨迹比大西洋的水汽较短。西北方向的两路水汽主要是陆源,并且两路水汽源都是跟随西风环流,一路水汽越过帕米尔高原、喀拉昆仑山和西昆仑到达昆仑山东部的木孜塔格峰地区,另一路则穿越天山山脉和塔里木盆地进入[31]。由陆源和海源的比例可以看出,该区域的水汽主要是由陆源控制,这与李颖等[32]对青藏高原内流区水汽来源的研究结果一致。

此外,对2005年、2010年、2015年、2020年和2022年的4个季节的平均轨迹进行聚类,分别聚类为3~4类,分析不同年份陆源水汽和海源水汽的变化。总体分析,2005—2022年陆源水汽占比呈现先上升后下降的变化,海源水汽占比呈现先下降后上升的变化。2022年海源水汽占比超过了陆源占比,其中,海源水汽占57.43%,陆源水汽占42.57%。同时,海源的2个方向水汽,即西风和印度季风的变化也不尽相同。该地区印度季风水汽的占比表现出持续上升的趋势,但在2010年的聚类图中几乎没有印度季风水汽;而西风表现出波动变化但是总体上占比是增加的,并且在2005—2010年和2020—2022年的变化非常大,分别下降了9.15%和上升了10.8%。此外,在2022年西风水汽占比达26.48%,印度季风水汽达30.96%,海源水汽占全部水汽的57.44%,该地区的水汽慢慢的从陆源水汽控制转变成海源水汽控制。

3.3 水汽来源季节变化

本文对2005—2022年4个季节的多年平均轨迹进行聚类,分析不同季节水汽轨迹的变化特征。选用每个季节的中间月份作为代表,即1月为冬季、4月为春季、7月为夏季和10月为秋季。

如图4所示,冬季的主导水汽是海源水汽,其中,西南印度季风水汽占比最大为55.97%,占全部水汽的一半以上,其次是西风水汽,占比为26.29%,陆源水汽的主要方向为正西方向且占比较小,为17.74%;春季的主导水汽是陆源水汽,主要有2个方向,正西方向和西北方向,分别占44.87%和43.53%,海源水汽主要是西风水汽,占总量的11.60%;与其他几个季节的水汽不同的是,夏季的陆源水汽分为2种,一种是来自陆地地区的外部水汽源[33],一种是研究区附近的水汽,通常把这种局地地区的水汽划分为再循环水汽。青藏高原的冰雪融水非常丰富,形成大量规模不等的湖泊,在夏季,降水增多和气温升高,水汽蒸发强烈,并且受地形的影响,容易形

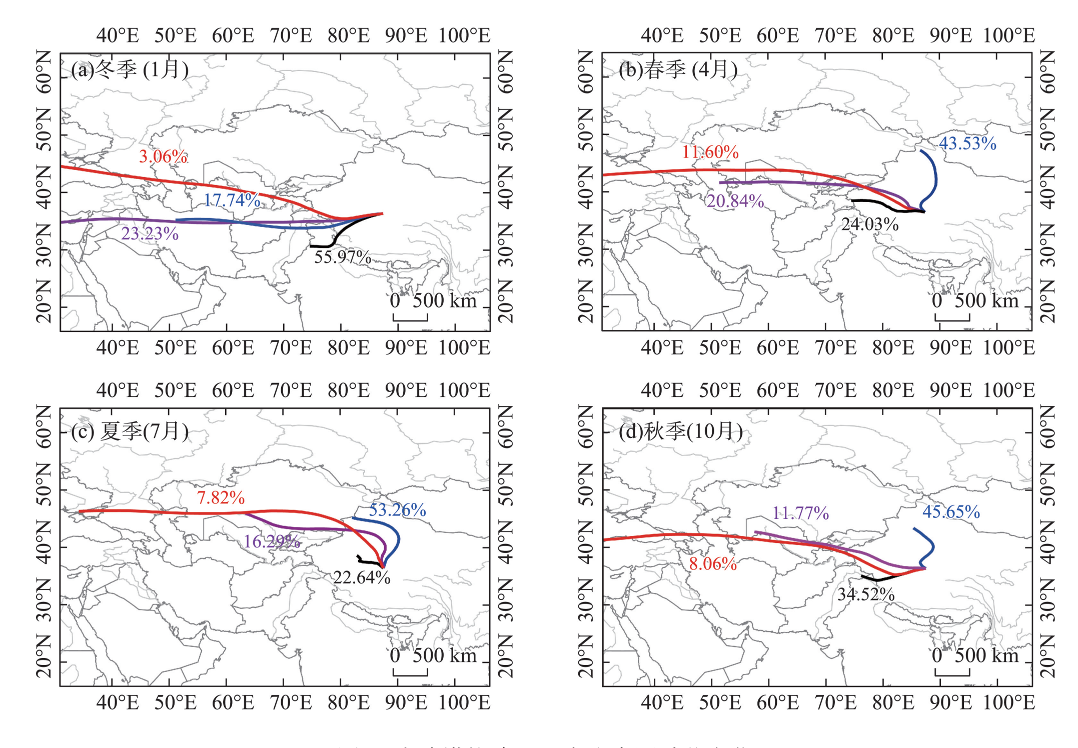


图4 木孜塔格峰地区水汽来源季节变化

Fig. 4 Seasonal variation of water vapor sources in Ulugh Muztagh area

成局地降水，再循环水汽贡献较大。在木孜塔格峰地区夏季再循环水汽占总量的22.64%，西北方向陆源水汽占比最大，为53.26%，占总量的一半以上，海源水汽主要是西风水汽，占总量的24.10%，夏季的主导水汽是陆源水汽，占总量的75.90%。

秋季陆源和海源的水汽比例相对于其他季节的水汽较平均，但总体来说是陆源水汽占比较大。秋季海源的西风和印度洋季风分别占总量的8.06%和34.52%，陆源分别来自2个方向，正西方向和西北方向，分别占总量的11.77%和45.65%，其中，西北方向的陆源水汽占比最大，其次为西南印度洋季风。从总体上来看，全年4个季节里西风水汽占比最少，并且在冬季最大为26.29%，夏季最少为7.82%，并且印度洋水汽主要发生在秋冬季节，春夏季节的印度洋水汽占比相对较少。陆源水汽占比最大，并且在夏季再循环水汽的贡献非常明显。该地区除了冬季水汽由海源控制，其他3个季节都是由陆源水汽控制，其原因可能冬季低温不利于地表蒸散发作用，暖季高温有利于加强蒸散发作用。

3.4 印度洋水汽运动的特殊性

木孜塔格峰地区的水汽主要有包括海源（大西洋水汽和印度洋水汽）和陆源（包括再循环水汽）2个源地，其中，大西洋水汽主要通过西风环流将水汽输送到木孜塔格峰地区，并且水汽在进行远距离输送相对应的海拔较高，使得水汽在前进时受的阻碍较小；印度洋水汽从印度洋出发，需要爬升越过喜马拉雅山脉，进入平均海拔约为4000 m的青藏高原内流区。相较于西风水汽，印度洋水汽的运动轨迹更为曲折。本文选取2022年1月的印度洋水汽和西风水汽各一条轨迹进行对比分析（图5）。

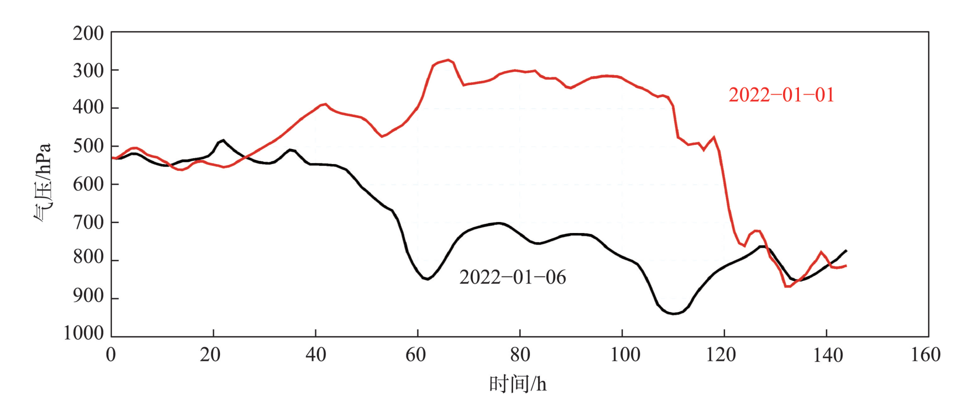
在144 h时，2条轨迹处于大致相同的海拔高度，西风水汽受青藏高原地形影响，被迫抬升至约9000 m高度形成高空水汽团，受西风带影响继续向东移动，最后在距离到达目的地60 h时下降高度到达木孜塔格峰地区。而来自印度洋的水汽经历了多次下沉和抬升，以对流的形式爬升到青藏高原，最后到达青藏高原北部。需要说明的是，并非所有的印度洋水汽的轨迹都是和图中轨迹一样，水汽后向轨迹主要是基于理论计算，需要深入探讨和进一步模拟验证。喜马拉雅山脉山谷有利于高原的水汽输送[31]，一些水汽可以利用地形条件从山谷地区爬升进入高原地区，为高原地区带来降水。

4 结 论

本文以东昆仑木孜塔格峰为研究区，采用GDAS数据基于HYSPLIT模型示踪了木孜塔格峰地区的降水水汽来源，根据空间总方差（TSV），对该地区的水汽轨迹多年平均、季节多年平均进行聚类分析，探讨该地区水汽源，此外，对来自不同方向的海源水汽轨迹进行深入分析，主要得出以下结论：

（1）随中纬度西风带进入青藏高原的主要轨迹有3条，由北至南进入分别是天山山脉、帕米尔高原以及高空进入青藏高原的大西洋水汽，分别占36.26%、26.26%、15.76%。此外，如何区分西风和印度季风环流对东昆仑木孜塔格峰地区的影响还需进一步研究。

（2）基于多年平均以及多年季节平均水汽轨迹聚类分析，木孜塔格峰地区主要是由陆源水汽控制，占总量的62.52%，海源水汽占41.81%，并且夏季



注：红色轨迹线表示西风，黑色轨迹线表示印度季风。

图5 2022年1月1日和6日轨迹变化

Fig. 5 Trajectory changes on January 1 and 6, 2022

局地再循环水汽占比较大,占总量的22.64%。

(3)来自印度洋的水汽从喜马拉雅山进入青藏高原,水汽是以对流的形式爬升进入青藏高原,而来自大西洋的水汽随西风带迅速抬升至对流层,经多次下沉、上升,最终从高空进入青藏高原腹地。

致谢:感谢中国科学院新疆生态与地理研究所、新疆巴音郭楞蒙古自治州阿尔金山国家级自然保护区管理局以及玉素甫阿勒克检查站等单位和部门对木孜塔格峰地区野外科考的大力帮助和支持。

参考文献(References):

[1] 孙赫, 苏凤阁, 黄敬恒, 等. 第三极西风和季风主导流域源区降水呈现不同梯度特征[J]. 科学通报, 2020, 65(1): 91-104. [Sun He, Su Fengge, Huang Jinghuan, et al. Contrasting precipitation gradient characteristics between westerlies and monsoon dominated upstream river basins in the Third Pole[J]. Chinese Science Bulletin, 2020, 65(1): 91-104.]

[2] 汤秋鸿, 刘宇博, 张弛, 等. 青藏高原及其周边地区降水的水汽来源变化研究进展[J]. 大气科学学报, 2020, 43(6): 1002-1009. [Tang Qiuhong, Liu Yubo, Zhang Chi, et al. Research progress on moisture source change of precipitation over the Tibetan Plateau and its surrounding areas[J]. Transactions of Atmospheric Sciences, 2020, 43(6): 1002-1009.]

[3] Yu W, Yao T, Tian L, et al. Relationships between $\delta^{18}O$ in precipitation and air temperature and moisture origin on a south-north transect of the Tibetan Plateau[J]. Atmospheric Research, 2008, 87(2): 158-169.

[4] Zhang C, Tang Q, Chen D, et al. Moisture source changes contributed to different precipitation changes over the northern and southern Tibetan Plateau[J]. Journal of Hydrometeorology, 2019, 20(2): 217-229.

[5] An W, Hou S, Zhang Q, et al. Enhanced recent local moisture recycling on the northwestern Tibetan Plateau deduced from ice core deuterium excess records[J]. Journal of Geophysical Research-Atmospheres, 2017, 122(23): 12541-12556.

[6] 田立德, 姚檀栋, 孙维贞, 等. 青藏高原南北降水中δD和δ~(18)O关系及水汽循环[J]. 中国科学(D辑:地球科学), 2001, 31(3): 214-220. [Tian Lide, Yao Tandong, Sun Weizhen, et al. Relationship between δD and $\delta^{18}O$ in north-south precipitation of the Qinghai-Tibet Plateau and water vapor cycle[J]. Science in China (Series D), 2001, 31(3): 214-220.]

[7] Li Y, Su F, Chen D, et al. Atmospheric water transport to the endorheic Tibetan Plateau and its effect on the hydrological status in the region[J]. Journal of Geophysical Research-Atmospheres, 2019, 124(23): 12864-12881.

[8] 杨梅学, 姚檀栋, 田立德, 等. 藏北高原夏季降水的水汽来源分析[J]. 地理科学, 2004, 24(4): 426-431. [Yang Meixue, Yao Tandong, Tian Lide, et al. Analysis of precipitation from different water vapor sources in Tibetan Plateau[J]. Scientia Geographica Sinica, 2004, 24(4): 426-431.]

[9] 饶文波, 李垚炜, 谭红兵, 等. 高寒干旱区降水氢氧稳定同位素组成及其水汽来源: 以昆仑山北坡格尔木河流域为例[J]. 水利学报, 2021, 52(9): 1116-1125. [Rao Wenbo, Li Yaowei, Tan Hongbing, et al. Stable hydrogen-oxygen isotope composition and atmospheric moisture sources of precipitation in an arid-alpine region: A case study of the Golmud River Watershed on the North slope of the Kunlun Mountains[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2021, 52(9): 1116-1125.]

[10] 余武生, 马耀明, 孙维贞, 等. 青藏高原西部降水中δ~(18)O变化特征及其气候意义[J]. 科学通报, 2009, 54(15): 2131-2139. [Yu Wusheng, Ma Yaoming, Sun Weizhen, et al. Climatic significance of $\delta^{18}O$ records from precipitation on the western Tibetan Plateau[J]. Chinese Science Bulletin, 2009, 54(15): 2131-2139.]

[11] 徐彦伟, 康世昌, 周石硚, 等. 青藏高原纳木错流域夏、秋季大气降水中δ~(18)O与水汽来源及温度的关系[J]. 地理科学, 2007, 27(5): 718-723. [Xu Yanwei, Kang Shichang, Zhou Shiqiao, et al. Variations of $\delta^{18}O$ in summer and autumn precipitation and their relationships with moisture source and air temperature in Nam Lake Basin, Tibet Plateau[J]. Scientia Geographica Sinica, 2007, 27(5): 718-723.]

[12] Zhang C, Tang Q, Chen D. Recent changes in the moisture source of precipitation over the Tibetan Plateau[J]. Journal of Climate, 2017, 30(5): 1807-1819.

[13] Dong W, Lin Y, Wright J S, et al. Summer rainfall over the southwestern Tibetan Plateau controlled by deep convection over the Indian subcontinent[J]. Nature Communications, 2016, 7(1): 10925.

[14] 李虎, 潘小多. 青藏高原水汽输送过程及水汽源地研究方法综述[J]. 地球科学进展, 2022, 37(10): 1025-1036. [Li Hu, Pan Xiaoduo. An overview of research methods on water vapor transport and sources in the Tibetan Plateau[J]. Advances in Earth Science, 2022, 37(10): 1025-1036.]

[15] Chen B, Zhang W, Yang S, et al. Identifying and contrasting the sources of the water vapor reaching the subregions of the Tibetan Plateau during the wet season[J]. Climate Dynamics, 2019, 53(11): 6891-6907.

[16] 任行阔, 高晶, 杨育龙, 等. 慕士塔格地区大气水汽氢氧稳定同位素季节内变化特征及影响因素分析[J]. 冰川冻土, 2021, 43(2): 331-341. [Ren Xingkuo, Gao Jing, Yang Yulong, et al. Intraseasonal characteristics of atmospheric water vapor stable isotopes at Muztagata and its climate controls[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2021, 43(2): 331-341.]

[17] 孙永, 易朝路, 刘金花, 等. 昆仑山木孜塔格地区冰川发育水汽来源探讨[J]. 地球环境学报, 2018, 9(4): 383-391. [Sun Yong, Yi Chaolu, Liu Jinhua, et al. Discussing sources of moisture feeding

the glaciers on the Ulugh Muztagh, Kunlun Mountain[J]. Journal of Earth Environment, 2018, 9(4): 383−391.]

[18] Wang A, Smith J A, Wang G, et al. Late quaternary river terrace sequences in the eastern Kunlun Range, northern Tibet: A combined record of climatic change and surface uplift[J]. Journal of Asian Earth Sciences, 2009, 34(4): 532−543.

[19] Guo W Q, Liu S Y, Wei J F, et al. The 2008/09 surge of central Yulinchuan glacier, northern Tibetan Plateau, as monitored by remote sensing[J]. Annals of Glaciology, 2013, 54(63): 299−310.

[20] 王树基, 黄明敏. 东昆仑山冰川作用述要(以木孜塔格峰一带为例)[J]. 干旱区地理, 1986, 9(4): 46−49. [Wang Shuji, Huang Mingmin. Problems on glaciation in eastern Kunlun Mt[J]. Arid Land Geography, 1986, 9(4): 46−49.]

[21] 郭万钦, 刘时银, 许君利, 等. 木孜塔格西北坡鱼鳞川冰川跃动遥感监测[J]. 冰川冻土, 2012, 34(4): 765−774. [Guo Wanqin, Liu Shiyin, Xu Junli, et al. Monitoring recent surging of the Yulinchuan glacier on North slopes of Muztag range by remote sensing[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2012, 34(4): 765−774.]

[22] Hoover B T, Santek D A, Daloz A-S, et al. Forecast impact of assimilating aircraft WVSS-II water vapor mixing ratio observations in the Global Data Assimilation System (GDAS)[J]. Weather and Forecasting, 2017, 32(4): 1603−1611.

[23] Su L, Yuan Z, Fung J C H, et al. A comparison of HYSPLIT backward trajectories generated from two GDAS datasets[J]. Science of the Total Environment, 2015, 506−507: 527−537.

[24] Perez I A, Artuso F, Mahmud M, et al. Applications of air mass trajectories[J]. Advances in Meteorology, 2015, 2015: 1−20.

[25] Warner M S C. Introduction to PySPLIT: A python toolkit for NOAA ARL's HYSPLIT model[J]. Computing in Science & Engineering, 2018, 20(5): 47−62.

[26] 孟鸿飞, 张明军, 王圣杰, 等. CWT方法在中国夏季降水水汽来源识别中的应用[J]. 干旱区研究, 2018, 35(4): 872−881. [Meng Hongfei, Zhang Mingjun, Wang Shengjie, et al. Application of CWT method in identifying water vapor sources of summer precipitation in China[J]. Arid Zone Research, 2018, 35(4): 872−881.]

[27] 岳俊, 李国平. 应用拉格朗日方法研究四川盆地暴雨的水汽来源[J]. 热带气象学报, 2016, 32(2): 256−264. [Yue Jun, Li Guoping. Study on the moisture source of rainstorms in Sichuan Basin by the Lagrangian method[J]. Journal of Tropical Meteorology, 2016, 32(2): 256−264.]

[28] 曾钰婷, 张宇, 周可, 等. 青藏高原那曲地区夏季水汽来源及输送特征分析[J]. 高原气象, 2020, 39(3): 467−476. [Zeng Yuting, Zhang Yu, Zhou Ke, et al. Analysis on the source and transport characteristics of moisture in Naqu of the Qinghai-Tibetan Plateau in summer[J]. Plateau Meteorology, 2020, 39(3): 467−476.]

[29] Cui L, Song X, Zhong G. Comparative analysis of three methods for HYSPLIT atmospheric trajectories clustering[J]. Atmosphere, 2021, 12(6): 698.

[30] 庄晓翠, 李博渊, 赵江伟, 等. 基于HYSPLIT模式分析的塔克拉玛干沙漠南缘暴雨水汽特征[J]. 气象, 2022, 48(3): 311−323. [Zhuang Xiaocui, Li Boyuan, Zhao Jiangwei, et al. Water vapor characteristics of rainstorm in southern Taklimakan Desert based on HYSPLIT model analysis[J]. Meteorological Monthly, 2022, 48(3): 311−323.]

[31] Curio J, Maussion F, Scherer D. A 12−year high-resolution climatology of atmospheric water transport over the Tibetan Plateau[J]. Earth System Dynamics, 2015, 6(1): 109−124.

[32] 李颖, 苏凤阁, 汤秋鸿, 等. 青藏高原主要流域的降水水汽来源[J]. 中国科学:地球科学, 2022, 52(7): 1328−1344. [Li Ying, Su Fengge, Tang Qiuhong, et al. Contributions of moisture sources to precipitation in the major drainage basins in the Tibetan Plateau[J]. Science China Earth Sciences, 2022, 52(7): 1328−1344.]

[33] Hua L, Zhong L, Ma Z. Decadal transition of moisture sources and transport in northwestern China during summer from 1982 to 2010: Precipitation Change in Northwest China[J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 2017, 122(23): 12522−12540.

Analysis of moisture feeding in the Ulugh Muztagh area of the East Kunlun Mountains

WU Jiakang[1,2], CHEN Lihua[1,2], CHE Yanjun[1,2,3,4],
ZHANG Mingjun[3,4], CAO Yun[1], GU Lailei[3,4]

(1. School of Geography and Environment, Jiangxi Normal University, Nanchang 330022, Jiangxi, China;
2. Department of Geographical Science, Yichun University, Yichun 336000, Jiangxi, China; 3. College of Geography and Environmental Science, Northwest Normal University, Lanzhou 730070, Gansu, China; 4. Key Laboratory of Resource Environment and Sustainable Development of Oasis, Gansu Province, Lanzhou 730070, Gansu, China)

Abstract: Precipitation acts as a crucial supply for mountain glaciers, and its water vapor source closely correlates to the amount of precipitation. This study focuses on the modern glacier distribution area of Ulugh Muztagh in the eastern Kunlun Mountains, analyzing water vapor sources in the region from 2005 to 2022 using the Hybrid Single Particle Lagrangian Integrated Trajectory (HYSPLIT) model and the Global Data Assimilation System (GDAS). Employing backward trajectory analysis, we reveal the source and regularity of water vapor in the Ulugh Muztagh region and discuss its seasonal changes. The results show that the water vapor source in the Ulugh Muztagh area mainly extends to the Eurasian interior along the midlatitude westerly belt and is divided into three routes entering the Qinghai-Tibet Plateau from the Tianshan Mountains, the Pamir Plateau, and over the high-altitude stratosphere. On the Qinghai-Tibet Plateau, water vapor from the Indian Ocean either moves northward over the Himalayas or turns northwestward to merge with the westerly circulation into the plateau's hinterland. Land-source water vapor, entering from the Pamir Plateau and Tianshan Mountains, accounts for 62.52% of the total water vapor in the Ulugh Muztagh area. Meanwhile, sea source water vapor, comprising high-altitude water vapor from the westerly belt (Atlantic water vapor) and the Indian Ocean, accounts for 37.48% of the total water vapor. Notably, we find that the proportion of water vapor from the sea source has increased steadily over recent decades. Analyzing multiyear seasonal averages for water vapor, we find a notably high proportion of locally recycled water vapor in the summer, comprising 22.64% of the total. This study's outcomes offer valuable insights into the water cycle dynamics of the Ulugh Muztagh area in the East Kunlun Mountains.

Keywords: Ulugh Muztagh Mountains; HYSPLIT model; sources of moisture; East Kunlun Mountains